

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт: Энергетический
 Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника
 Кафедра Атомных и тепловых электростанций

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ БЕСКОНТАКТНОЙ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ДВУХФАЗНОГО ВЫСОКОГРАДИЕНТНОГО ПОТОКА

УДК 621.1.016.7.001.24

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Б	Габдуллина Альбина Ильгизовна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры АТЭС	А.А. Матвеева	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры менеджмента	А.А. Фигурко	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности	М.В. Василевский	К.Т.Н.		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ст. преподаватель кафедры атомных и тепловых электростанций	М.А.Вагнер	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
атомных и тепловых электростанций	А.С. Матвеев	К.Т.Н., доцент		

Томск – 2016 г.

Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы магистра по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	Универсальные компетенции	
P1	Использовать представления о методологических основах научного познания и творчества, анализировать, синтезировать и критически оценивать знания	Требования ФГОС (ОК- 8, 9; ПК-4), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P2	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-3; ПК-8, 24), Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы, состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации, осуществлять педагогическую деятельность в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС (ОК-4, 5; ПК-3, 16, 17, 25, 27, 28, 32), Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах устойчивого развития.	Требования ФГОС (ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп.2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P5	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, 2, 6), Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
	Профессиональные компетенции	
P6	Использовать глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания для	Требования ФГОС (ПК-1, 5), Критерии 5 АИОР (п.1.1),

	создания и применения инновационных технологий в теплоэнергетике	согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P7	Применять глубокие знания в области современных технологий теплоэнергетического производства для постановки и решения задач инженерного анализа, связанных с созданием и эксплуатацией теплотехнического и теплотехнологического оборудования и установок, с использованием системного анализа и моделирования объектов и процессов теплоэнергетики	Требования ФГОС (ПК-2, 7, 11, 18 – 20, 29, 31), Критерий 5 АИОР (пп.1.1, 1.2, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P8	Разрабатывать и планировать к разработке технологические процессы, проектировать и использовать новое теплотехнологическое оборудование и теплотехнические установки, в том числе с применением компьютерных и информационных технологий	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 12 – 15, 30), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Использовать современные достижения науки и передовой технологии в теоретических и экспериментальных научных исследованиях, интерпретировать и представлять их результаты, давать практические рекомендации по внедрению в производство	Требования ФГОС (ПК-6, 22 – 24,), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P10	Применять методы и средства автоматизированных систем управления производства, обеспечивать его высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на теплоэнергетическом производстве, выполнять требования по защите окружающей среды.	Требования ФГОС (ПК-21, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Готовность к педагогической деятельности в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС (ПК-32), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Министерство образования и науки Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
 образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический
 Направление подготовки **13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника**
 Кафедра «Атомных и тепловых электростанций»

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой АТЭС ЭНИН
 А.С. Матвеев

 (Подпись)

 (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации
(бакалаврской работы, /работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ4Б	Габдуллиной Альбине Ильгизовне

Тема работы:

РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ БЕСКОНТАКТНОЙ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ДВУХФАЗНОГО ВЫСОКОГРАДИЕНТНОГО ПОТОКА	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	20.04.16 №3057/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	20 мая 2016 года
--	-------------------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Отношение давлений на сопло $0,766 \div 0,909$ Расход подаваемой воды $6,2 \cdot 10^{-8} \div 12,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 / \text{с}$
---------------------------------	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в исследовании характеристик двухфазного потока. 2. Постановка задачи исследования. 3. Описание методов IPI и PTV. 4. Конструкция экспериментального стенда. 5. Методика проведения эксперимента. 6. Обработка результатов эксперимента. 7. Анализ полученных данных. 8. Заключение по работе.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Фигурко А.А., доцент кафедры менеджмента
Социальная ответственность	Василевский М.В., доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: Эрозия выходных кромок рабочих лопаток.	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	28 декабря 2015 года
---	-----------------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АТЭС	Матвеева А.А.	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Б	Габдуллина А.И.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ4Б	Габдуллиной Альбине Ильгизовне

Институт	ЭНИН	Кафедра	АТЭС
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Определение и анализ трудовых и денежных затрат, направленных на реализацию исследования. Приблизительная стоимость ресурсов научного исследования, в том числе научно-технического оборудования.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность»
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления по страховым выплатам – 30% от ФОТ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Технико-экономическое обоснование НИР
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Не разрабатывается
3. <i>Планирование процесса управления НТИ</i>	Определение этапов работы, трудоемкости работы, сметы затрат, расчет нарастания технической готовности работ.
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Оценка экономической эффективности проекта, научно-технического уровня НИР.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. FAST-анализ проекта
2. Функционально-стоимостная диаграмма программного комплекса

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	19.02.16
--	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко Аркадий Альбертович	к. э. н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Б	Габдуллина А.И.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ4Б	Габдулиной Альбине Ильгизовне

Институт	Энергетический	Кафедра	АТЭС
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p><i>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) – негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу) – чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера) 	<p>Объектом исследования является двухфазный поток. При обслуживании оборудования на рабочий персонал воздействуют следующие факторы:</p> <p>Вредные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – повышенный уровень шума в помещении; – недостаточная освещенность. <p>Опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – электрический ток; – опасность возникновения пожара.
<p><i>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме.</i></p>	<p>ГОСТ Р ИСО 26000 «Руководство по социальной ответственности» ГОСТ 12.0.003-74 «Опасные и вредные производственные факторы» ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности ГОСТ 12.1.004-91 (1999) - ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования ГОСТ 12.1.005-88 (с изм. №1 от 2000 г.). ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны ГОСТ 12.1.009-76 (1999) -ССБТ. Электробезопасность. Термины и определения ГОСТ 12.1.012-90 (2001) - ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	

Реферат

Выпускная квалификационная работа 96с., рис. 26, табл.13, источников 31, приложение 1.

Ключевые слова: ДИСПЕРСНОСТЬ, ДВУХФАЗНЫЙ ПОТОК, КРОМКА ЛОПАТКИ, МЕТОД IPI, МЕТОД PTV, СТРУКТУРА ПОТОКА, ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ.

Объектом исследования является двухфазный поток.

Цель работы – проведение экспериментальных исследований с целью разработки и апробации бесконтактной методики определения параметров жидкой фазы двухфазного высокоградиентного потока.

В процессе исследования проводилась регистрация мгновенных распределений скоростей и диаметров капель, с помощью совмещенных IPI и PTV методов.

В результате исследования была получена бесконтактная методика определения параметров многофазного потока.

Степень внедрения: результаты данной методики могут применяться для конструирования и усовершенствования турбин, работающих на влажном паре.

Область применения: силовые машины.

Экономическая эффективность: увеличение коэффициента полезного действия турбоагрегата, снижение количества топлива на выработку электроэнергии.

Определения, обозначения, нормативные ссылки

PTV - Particle Tracking Velocimetry;

IPI - Interferometric Particle Imaging;

ЛДА - лазерные доплеровские анемометры;

ЛРА - лазерные решеточные анемометры;

λ — длина волны света, м;

θ — угол рассеяния, °;

g - ускорение свободного падения, м/с³;

F - площадь сечения исследуемого потока, м²;

u - уменьшение освещенности измеренное фотометром, %;

$G_{вод}$ – расход подаваемой воды через отверстие, кг/с;

c_k - скорость капли, м/с²;

$G_{возд}$ – расход подаваемого воздуха, кг/с;

$P_{возд}$ – давление подаваемого воздуха, бар;

ε – отношение давлений;

t – время, с;

ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

μ_0 – коэффициент динамической вязкости, Па·с;

z – координата, м;

$M = \frac{V}{c}$ – критерий Маха;

$Re = \frac{Vl}{\nu}$ – критерий Рейнольдса.

Оглавление

Введение.....	12
1 Методы измерения размеров частиц дисперсной среды.....	13
1.1 Прямые методы измерения размеров капель.....	13
1.2 Косвенные методы измерения размеров капель.....	16
2 Методы измерения скорости частиц дисперсной среды.....	27
2.1 Электрический метод.....	27
2.2 Измерение скоростей частиц с использованием лазерных анемометров.....	28
3 Современные методы определения характеристик двухфазного потока.....	31
4 Структура капельной среды за сопловыми решетками турбины.....	32
5 Влияние режимных параметров на характеристики жидкой фазы за сопловой решеткой турбины.....	35
6 Постановка целей и задач исследования.....	39
7 Методика экспериментального исследования.....	40
7.1 Описание установки.....	40
7.2 Описание метода «Interferometric Particle Imaging».....	42
7.3 Описание метода Particle Tracking Velocimetry.....	46
7.4 Компоненты системы.....	48
8 Методика проведения эксперимента.....	49
9 Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	54
9.1 Организация и планирование работ.....	54
9.2 Расчет нарастания технической готовности работ.....	56
9.3 Расчет сметы затрат на исследование.....	57
9.3.1 Материалы и покупные изделия.....	58
9.3.2 Основная заработная плата.....	59
9.3.3 Расчет дополнительной заработной платы.....	61
9.3.4 Расчет отчислений на социальные нужды.....	62
9.3.5 Расчет затрат на электроэнергию.....	62
9.3.6 Расчет амортизационных расходов.....	64
9.3.7 Оплата работ, выполняемых сторонними организациями.....	64
9.3.8 Прочие расходы.....	64
9.3.9 Плановая себестоимость проекта.....	65
9.4. FAST-анализ проекта.....	65

9.7 Выводы по главе.....	70
10 Раздел «Социальная ответственность».....	72
10.1 Профессиональная социальная ответственность.....	73
10.1.1 Повышенный уровень шума в помещении.....	74
10.1.2 Освещение на рабочем месте.....	75
10.1.3 Электрический ток.....	80
10.1.4 Опасность возникновения пожара.....	82
10.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований	84
10.2.1 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.....	85
10.3 Экологическая безопасность.....	85
10.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду.....	86
10.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду.....	87
10.4 Безопасность при чрезвычайных ситуациях.....	88
10.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований.....	88
10.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	88
10.4.3 Порядок действий в случае возникновения ЧС.....	88
10. 5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	89
10.5.1 Соответствующие действия и ожидания.....	91
10.6 Заключение по разделу социальная ответственность.....	91
Заключение.....	93
Список литературы.....	94
Приложение А - Water drop erosion	97

Введение

Согласно энергетической стратегии развития России до 2020 года, основным двигателем, используемым на тепловых и атомных электростанциях для привода генератора переменного тока, будут служить паровые турбины.

Вопросам повышения надежности и экономичности паровых турбин всегда уделялось большое внимание. Но, не смотря на огромный опыт, накопленный в этой области, все еще существует возможность дальнейшего их совершенствования.

Одним из наиболее перспективных элементов дальнейших исследований являются ступени, работающие в области влажного пара.

Существует большое количество экспериментальных и расчетных работ в области определения характеристик полидисперсного потока, но появление относительно недавно, новых оптических методов для исследования двухфазных потоков, открывает возможность для более глубокого изучения процессов, происходящих при течении двухфазного потока в каналах турбинной ступени.

В данной работе представлены экспериментальные исследования движения двухфазного потока. Работа с применением современных методов изучения движения двухфазного потока проводилась в лаборатории по исследованию газодинамических процессов в оборудовании ТЭС и АЭС (101-б) на кафедре атомных и тепловых электростанций (АТЭС). Была разработана бесконтактная методика определения параметров жидкой фазы двухфазного высокоградиентного потока.

1 Методы измерения размеров частиц дисперсной среды

Существует огромное множество методов, с помощью которых можно определить размеры частиц двухфазной среды. Все существующие способы можно условно разделить на две группы: прямые и косвенные. Прямые методы, характеризуются непосредственной оценкой значения искомой величины. К таким методам относятся:

- Метод улавливания;
- Метод микрофотографии.

Косвенные методы характеризуются оценкой значения искомой величины по результатам измерения другой величины, связанной с искомой определенной зависимостью. Косвенные методы разделяются на следующие группы:

- Аэродинамические методы;
- Электрические методы;
- Оптические методы.

Кроме того, могут быть использованы комбинированные методы. Рассмотрим каждый метод более подробно.

1.1 Прямые методы измерения размеров капель

Метод улавливания

В свою очередь, метод улавливания существует в четырех вариантах:

- Улавливание на пластину, покрытую тонким слоем вещества, не смешивающегося с жидкостью;
- Улавливание в сосуд с жидкостью;
- Улавливание на пластину, покрытую слоем сажи;
- Улавливание на сетку из органического стекла.

Пластину, сетку или сосуд помещают в камеру со специальным затвором, который регулирует подачу отбора капель. Затвор открывается на некоторое время, чтобы капли не сливались и не попадали друг на друга. Затем производят подсчет и измерение капель с помощью микроскопа или специализированного программного обеспечения.

Для улавливания капель на пластину, покрытую тонким слоем вещества, не смешивающегося с жидкостью, в основном применяют глицерин. Далее по отпечаткам капель определяется их размер и количество.

При улавливании в сосуд с жидкостью, капли при ударе о поверхность жидкости менее подвержены дроблению. Если плотность улавливающей жидкости меньше плотности капель, то последние опустятся на дно сосуда и при оптически чистой поверхности дна их легко измерить или сфотографировать. При правильном подборе улавливающей жидкости капли могут долгое время, не испаряясь, сохранять свою форму [1].

При третьем варианте метода для получения четких фотоснимков обычно поверх слоя сажи наносят слой окиси магния. С помощью этого отпечатки капель видны достаточно контрастно.

Четвертый вариант метода улавливания – улавливание на сетку из органического стекла (1 мкм). Капли, попадая на эту сетку, прочно удерживаются силами поверхностного натяжения. Уловленные капли необходимо сразу же измерять, так как в результате испарения появляется искажение результатов измерения [1].

Метод улавливания хоть и относительно прост и не такой трудоемкий, но он имеет ряд своих недостатков:

1. Произвольность выбора измерения по месту и по времени;
2. Относительно малое количество измеряемых капель;
3. Увеличение числа контролируемых капель делает исследования трудоемкими;
4. При ударе капель о пластину они деформируются;
5. Результаты измерения искажаются испарением;
6. Слипание рядом упавших капель;
7. Разные варианты метода применимы для разных размеров капель;
8. Нарушается пространственное расположение капель при переносе сосудов.

Метод микрофотографии

Принципиальная схема применяемой фотоустановки изображена на рисунке 1. Она состоит из: осветителя 1, с конденсором 2, форсунки 3, микроскопа 4, установленного на расстоянии S от плоскости измерения, изображение которой проектируется микроскопом на матрицу камеры 5 [1].

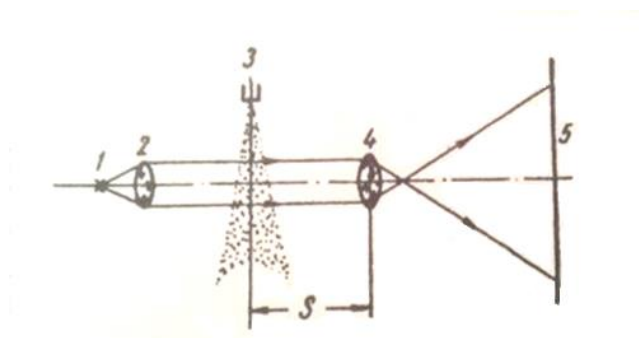


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки для микрофотографии капель[1]

Микрообъектив фотокамеры должен иметь большую разрешающую способность, для получения фотографий мелких предметов. Также потребуется мгновенный (10^{-8} сек.) и мощный световой импульс [1].

Данный метод имеет недостатки, такие как:

1. Установка отсекающих (для отвода части потока снаружи факела) вызывает нарушение процесса распыливания;
2. Применение дорогостоящей аппаратуры;
3. В поле зрения фотоаппарата попадают капли находящиеся на различном расстоянии от плоскости фокусировки. В результате чего этого капли, получившиеся на снимке четко, но лежащие на границах резкости, при их равном размере, будут иметь на фотографии из-за неравного расстояния от объектива разную величину.

1.2 Косвенные методы измерения размеров капель

Аэродинамический метод

Аэродинамический метод основан на использовании зависимости между силой сопротивления полета капли и ее размером. Данный метод можно разделить на две группы. Первая группа методов, основанная на законе Стокса, вторая – на связи траектории полета капли и ее размера [1].

Метод измерения размеров капель по скорости их падения.

В случае падения в высокий сосуд смешанного пучка капель, этот пучок разделяется, и для каждого размера капель устанавливается своя скорость движения. По истечению времени капли сепарируются по высоте и в сосуде образуется ряд их слоев, падающих с различной скоростью, крупные с большей, мелкие с меньшей [1]. Измеряя скорость падения капель и плотность каждого слоя, определяют размер капель по формуле:

$$V = \frac{2}{9} \cdot \frac{g \cdot r^2}{\eta} \cdot (\rho_2 - \rho_1),$$

Где g - ускорение свободного падения;

r – радиус капли;

η - вязкость среды, в которой падает капля;

$\rho_2 - \rho_1$ - разность плотностей капли и среды.

Седиментометрический метод.

Этот метод состоит в том, что определяют количество (вес) частиц, выпавших за одинаковые промежутки времени, по этим данным строят график седиментометрической кривой. На оси абсцисс откладывают время, а на оси ординат вес.

Применяемая аппаратура при измерении капель седиментометрическим методом очень простая и состоит из микровесов и высокой камеры с затвором, открывающегося на короткое время для поступления распыленной жидкости в камеру, где капли через некоторый промежуток начинают осаждаться на чашу микровесов с постоянной скоростью. Передвигая весы по сечению факела, можно получить характеристику распределения капель по размерам для различных участков факела. С помощью следующих формул можно вычислить, каких размеров капли выпали на весы к моменту времени t [8]:

$$r = \frac{C}{\sqrt{t}}, \quad C = \sqrt{\frac{H}{k \cdot t}}, \quad k = \frac{2}{9} \cdot \frac{g \cdot r^2}{\eta} \cdot (\rho_2 - \rho_1).$$

Измеряя вес выпавших частиц через промежутки времени и пересчитав, какие частицы выпадают за это время, можно по этим данным построить интегральную кривую распределения исследуемого потока по

размерам, где каждому значению радиуса капли будет соответствовать общий вес капель.

Метод, основанный на связи траектории полета капель и ее размера.

Суть метода заключается в том, что исследуемый поток распыляют через форсунку. На определенном расстоянии от форсунки установлены баки. Капли в зависимости от размеров имеют различное аэродинамическое сопротивление и, следовательно, различную дальность, поэтому в баки, расположенные ближе к форсунке, попадут более мелкие капли, а в баки, расположенные дальше, - крупные [1].

При аэродинамическом методе можно выделить следующие недостатки:

Метод измерения размеров капель по скорости их падения

1. Сложность в подборе улавливающей жидкости для частиц различных размеров;

Седиментометрический метод

2. Трудность получения равномерной скорости осаждения;
3. Испарение капель;

Метод сепарирования

4. Из-за различных углов вылета топлива из форсунки невозможно произвести измерения сразу для всего факела.

Электрические методы

Сущность метода заключается в регистрации частоты замыкания каплями исследуемой жидкости, проходящими между электродами, которые расположены на различных расстояниях. Основным недостатком данного метода является возникновение ложных импульсов, которые

создаются заряженными каплями, не замыкающими электроды. Для предотвращения данного явления используют схему с селекцией по амплитуде. При этом теряются полезные импульсы, амплитуда которых оказывается меньше порогового уровня [2]. Данную схему можно использовать для влажнопаровых потоках со скоростью не выше 40-50 м/с.

При больших скоростях потока (до 180 м/с) была предложена схема с высокочастотной коррекцией, которая представлена на рисунке 2 [2].

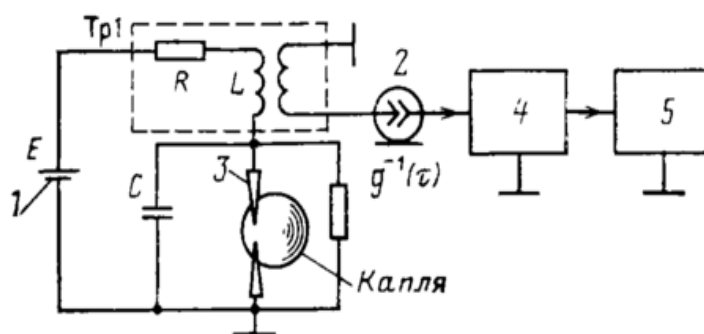


Рисунок 2 – Измерительная схема прибора для измерения диаметра капель электрическим методом [2]

1 – стабилизированный источник постоянного напряжения; 2 – частотометр; 3 – игольчатые электроды; 4 – импульсный усилитель; 5 – импульсный счетчик.

Постоянное напряжение подается во входную часть измерительной схемы. В первичной обмотке возникает ток при замыкании электродов капель. Импульс с вторичной обмотки подается на частотометр и далее на импульсный счетчик, проходя через импульсный усилитель. Резистор R в данной схеме служит для регулировки полосы пропускания контура, образованного первичной обмоткой трансформатора и паразитной емкостью. Схема обеспечивает эффективное подавление помех. В тоже время из-за подъема частотной характеристикой на высоких частотах

амплитуда полезных импульсов увеличивается. При этом уменьшается число потерянных импульсов от капель малого размера. Скорость счета импульсов определяется с помощью счетчика [2].

Обработка опытных данных сводится к численному интегрированию уравнения [3]:

$$f(d_k) = (A \alpha F / 16 \pi d_k) \int_1^{\bar{d}_{km}} (\bar{S}^2 - 1) \bar{S}^{-2} \left[15 (d_k \bar{S})^{-3/2} + 15 \alpha (d_k \bar{S})^{-1} + 6 \alpha^2 (d_k \bar{S})^{-1/2} + \alpha^3 \right] \cdot \exp(-\alpha \sqrt{d_k \bar{S}}) d\bar{S},$$

Где $f(d_k)$ - плотность распределения количество капель по размерам;

A и α - коэффициенты аппроксимации;

F - площадь сечения исследуемого потока;

d_k - диаметр капли;

$\bar{S} = S / d_k$ - относительное расстояние между электродами;

d_{km} - максимальный диаметр капли.

Оптические методы

Эти методы основаны на таких оптических явлениях, как рассеивание, отражение и поглощение света, интерференция и дифракция, наблюдаемые при прохождении луча света через капельный туман. Степень поглощения, ширина дифракционных колец, расстояние между интерференционными полосами зависят от диаметра капель, находящихся на пути светового луча. Внимания заслуживают приборы, основанные на явлениях поглощения света каплями, интерференции и дифракции. К частицам различных размеров применимы различные методы

исследования дисперсности. Оптические методы измерения не оказывают воздействия на поток распыленной жидкости и не нарушают процесс распыливания. Для измерений желательно использовать монохроматический источник света. Ослабление света, проходящего через мутную среду, подчиняется экспоненциальному закону. Оценка коэффициента затухания по измерениям ослабления света дает возможность определить радиус частицы.

Суть фотометрического метода заключается в следующем: лучи света пропускаются через факел распыленной жидкости, и по уменьшению яркости этих лучей подсчитывается средний размер капель с помощью формулы [1]:

$$r_m = 95,5 \frac{Q}{D_{\phi} u V},$$

где Q – объемный расход;

D_{ϕ} – диаметр факела;

u - уменьшение освещенности в %, измеренное фотометром;

V – скорость полета капель.

Схема установки, работающей по этому методу, изображена на рисунке 3.

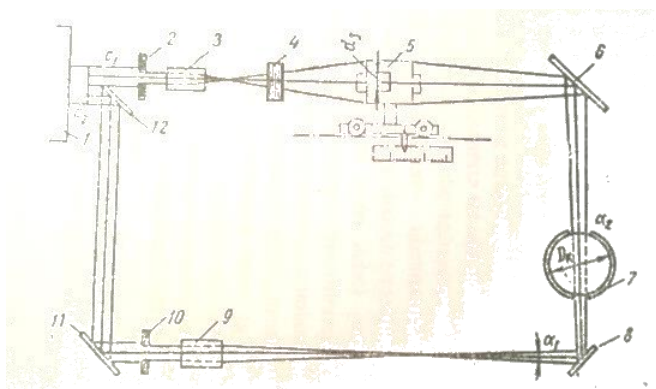


Рисунок 3 – Схема измерения капель фотометрическим методом [1]

Параллельный пучок света, выходящий из проекционного аппарата 1, падает на разделительное зеркало 12 и разбивается на два луча – один луч (C_2) попадает на фотометр 5 через диафрагму 10 и камеру 7 с распыленным топливом, другой через диафрагму 2 и компенсационные стекла 4. Для изменения хода лучей установлен ряд зеркал (6, 8 и 11) и два проектора 3 и 9. Фотометр измеряет относительное уменьшение количества света при прохождении луча через факел.

Сущность метода радуги заключается в том, что при падении плоской световой волны на капли, лучи света, испытывают преломление и внутреннее отражение, образуют новую поверхность, которая взаимодействуя с падающей, дает интерференционную картину [1].

При монохроматическом свете эта картина представляет собой ряд концентрических дуг [1]. угловое расстояние между этими дугами определяется длиной волны падающего света λ , радиусом и показателем преломления каплей n и разностью двух значений параметров, соответствующих первой и второй полосам дуги $\Delta_z = Z_1 - Z_2$. Тогда радиус определится по следующей формуле [1]:

$$r = \frac{\Delta Z}{\Delta \theta} = \frac{\left(\frac{9}{4} \sqrt{\frac{4-n}{(n^2-1)^3}} \right)^{1/2} \cdot \lambda}{6,93},$$

Схема измерения размера капелл представлена на рисунке 4.

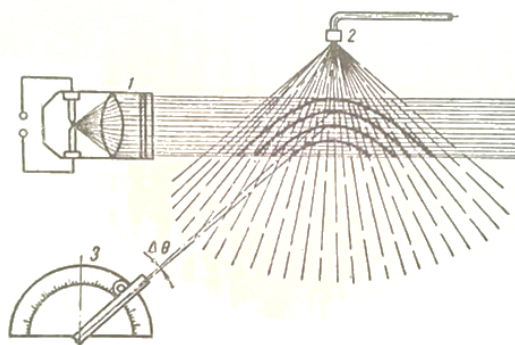


Рисунок 4 – Схема измерения размеров капель методом радуги [1]

Поток света из проектора 1 через светофильтр падает на факел топлива, распыливаемого форсункой 2. В результате интерференции образуется ряд концентрических колец, угловое расстояние между ними $\Delta\theta$ измеряется угломером 3. На основании результатов измерения $\Delta\theta$ по уравнению, приведенному выше, определяется средний радиус капель [1]. Данный метод пригоден для капель равного диаметра.

При использовании метода дифракционных колец для измерения размеров капель на факел направляют луч света и в результате прохождения его через капли, как непрозрачные маленькие диски, образуются дифракционные кольца. Измеряя расстояние от центра до любого кольца θ и зная порядок этого кольца от центра n , радиус капли определяется из уравнения [1]:

$$r = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \cdot (n + 0,22).$$

Метод дифракционных колец имеет ряд ограничений: во-первых, он непригоден при наличии в месте измерения капель различного диаметра; во-вторых, наблюдение дифракционных колец, образующихся вокруг источника света, при рассмотрении их через слой мелких капель, является затруднительным, так как источник света значительно ярче колец.

Рассмотрим практическое применение методов определения размеров частиц применительно к турбинам. Универсальным методом изучения дисперсных сред, применимым в широком диапазоне радиусов капель (0,01-100 мкм), следует считать метод измерения индикатрисы рассеяния. Для определения размеров капель, взвешенных в паровом пространстве, применяется метод малых углов, предложенный К. С. Шифриным и его сотрудниками [5]. Метод малых углов в принципе не позволяет получить информацию о размерах мелких фракций. Причиной является то, что интенсивность рассеянного при малых углах света от

крупных частиц на несколько порядков превышает вклад в рассеяние мелкими частицами [4]. Метод, основанный на измерении спектральной прозрачности, по сути, является частным и худшим случаем метода малых углов.

Конструкция зонда, в котором использован метод малоуглового рассеяния света представлен на рисунке 5.

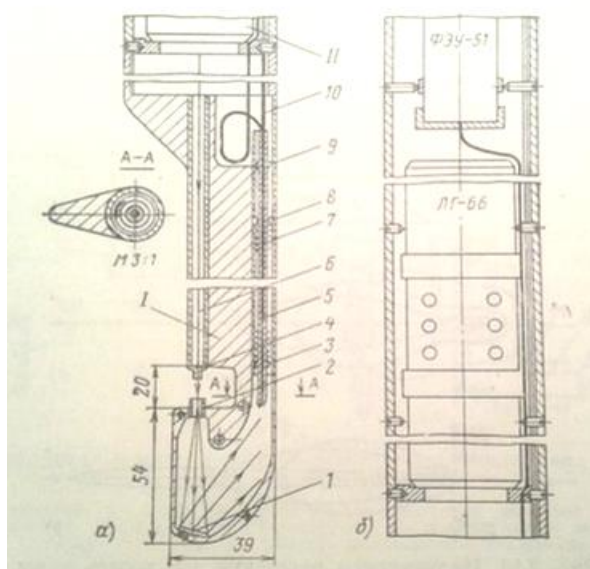


Рисунок 5 – Схема оптического зонда для измерения крупных частиц методом малоуглового рассеяния света [2]

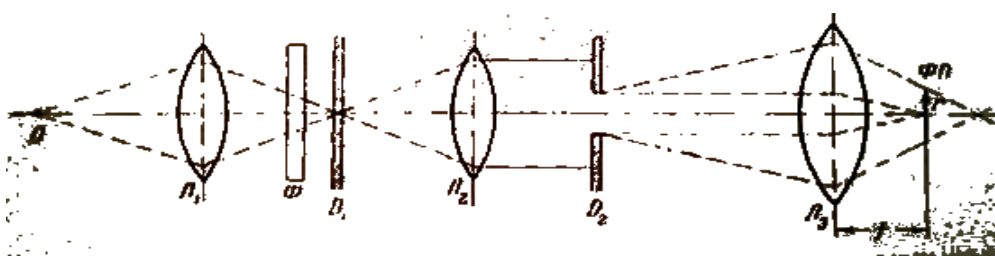


Рисунок 6 – Схема оптического устройства для исследования распределения света под малыми углами [4]

О – осветитель; Л₁ – конденсорная линза; Ф – узкополосный светофильтр; D₁ – точечная диафрагма; Л₂ – коллиматорная линза; D₂ – выходная диафрагма; Л₃ – приемная линза; r – расстояние до переломного

луча, рассеянного под углом β в фокальной плоскости линзы L_3 ; f – фокусное расстояние линзы

Зонд представляет приемник I, жестко соединенный с трубой II. Световой поток от источника света – лазера попадает в просвечиваемый объем. Рассеянный в этом объеме свет попадает на зеркало 1. Для снижения погрешностей за счет паразитных отражений используется диафрагма 2. Индикатриса рассеяния регистрируется с помощью светодиода 3. Диафрагма 4 используется для сужения исходного просвечивающего светового пучка лазера 5. Трос 10 позволяет перемещать светодиод. Светодиод 3 образует петлю. Эта петля обеспечивает укладку светодиода при его перемещении без резких изломов. К приемнику рассеянного света светодиод проходит по корпусу зонда возле лазера и крепится вблизи приемного фотоумножителя. Головку зонда помещают в исследуемый поток влажного пара, снимают показания измерительного прибора, включенного на выходе фотоумножителя. По полученной зависимости интенсивности светового потока от координаты торца светодиода 3 определяют индикатрису рассеянного света [2]. Данный зонд используется для измерения частиц размером $10^{-5} < d_k < 2 \cdot 10^{-4}$ м.

Для измерения размеров мелких частиц ($10^{-8} < d_k < 2 \cdot 10^{-6}$ м) используется метод асимметрии индикатрисы рассеяния. Показателем степени асимметрии индикатрисы рассеяния является отношение I_1/I_2 – интенсивность рассеянного света под углом β к направления падающего излучения I_0 . Для определения угла наблюдения отношения I_1/I_0 зависит от размера частиц.

Схема зонда с применением гелий-неонового лазера показана на рисунке 7.

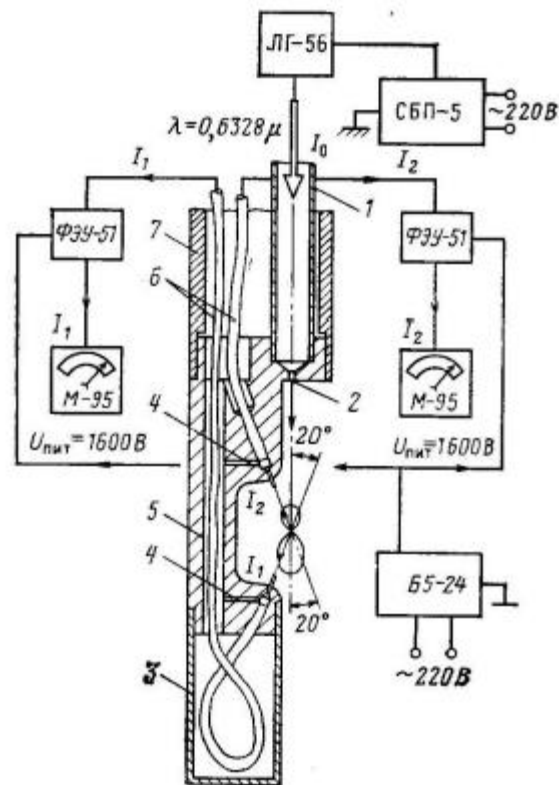


Рисунок 7 – Схема оптического зонда для измерения мелких частиц методом асимметрии индикатрисы рассеяния [2]

Лазер ЛГ-56 с блоком питания СБП-5 дает пучок света с длиной волны $\lambda = 0,6328$ мкм. Фотометрирование интенсивности излучения рассеянного света под углом 20° осуществляется фотоэлектронным умножителем ФЭУ-51. Ток ФЭУ регистрируется микроамперметром М-95. Луч света от лазера по трубке 1 направляется через отверстие 2 диаметром 0,7 мм в головке 5 в исследуемый объем среды. Информация о рассеянии света через насадки 3 поступает к торцам светодиодов 6 и выводится ФЭУ. Трубка 1 и светодиоды 6 проходят внутри тубуса зонда, с которым соединена головка зонда 5. Насадка 3 предохраняет светодиод от механических повреждений. Отверстия в головке лежат в плоскости поляризации света [2].

2 Методы измерения скорости частиц дисперсной среды

Измерение скоростей частиц производится следующими способами:

1. Электрическим методом;
2. Измерение скоростей частиц с использованием лазерных анемометров.

2.1 Электрический метод

Электрический метод измерения диаметров капель может быть успешно использован для одновременного измерения скоростей капель. Пример схемы зонда, позволяющий использовать времяпролетный принцип определения скорости заряженных частиц, приведен на рисунке 8.

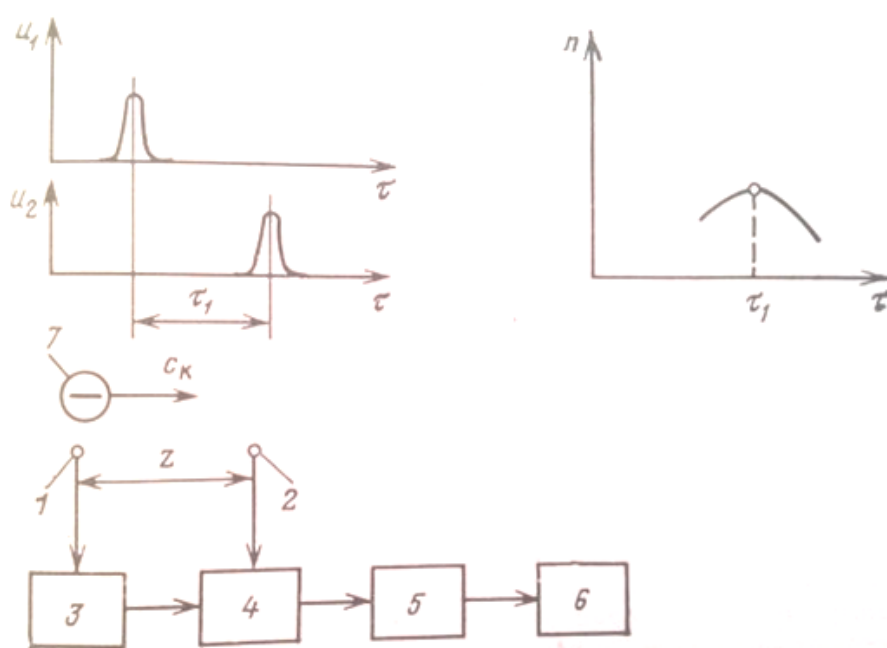


Рисунок 8 – Принцип действия измерительной схемы зонда для измерения скорости капли времяпролетным методом [2]

Капля 7, заряженная при скольжении в паровой фазе, пролетает вблизи точечных электродов 1 и 2 и наводит напряжение u_1 и u_2 в виде импульсов. Импульсы сдвинуты во времени на величину $\tau_1 = z/c_k$, по

которой и определяется скорость капли c_k . Схема с применением корреляционного анализа используется для подавления помех от других капель. Импульс от электрода 1 подается на схему задержки времени 3 и 4. Задержанный импульс подается на схему совпадения 5. На другой вход поступает импульс от электрода 2. Импульс на выходе схемы совпадения 5 появляется только в том случае, если задержанный импульс совпадает по времени с импульсом от второго электрода. Временем задержки τ_1 , при котором частота импульсов n , регистрируемая счетчиками 6, максимальна и определяется измеряемая скорость капли [2].

2.2 Измерение скоростей частиц с использованием лазерных анемометров

В двухфазных течениях эффективно применяется бесконтактный оптический метод измерения скорости движения жидкой фазы. Этот метод можно использовать для прямого измерения коэффициента скольжения жидких частиц.

Оптические испытания двухфазных сред используют лазерные доплеровские анемометры (ЛДА) и лазерные решеточные анемометры (ЛРА). Различие, между которыми заключается в том, что пространственная решетка – модулятор в ЛДА формируется за счет интерференции двух когерентных лучей лазера в потоке, а в ЛРА – либо проецируется в поток оптической системы, либо создается на фотоприемнике рассеянного света.

Рассмотрим принцип действия ЛДА и ЛРА. ЛДА по дифференциальной схеме, имеет преимущественное распространение и использующее прямое рассеяние света, изображен на рисунке 9.

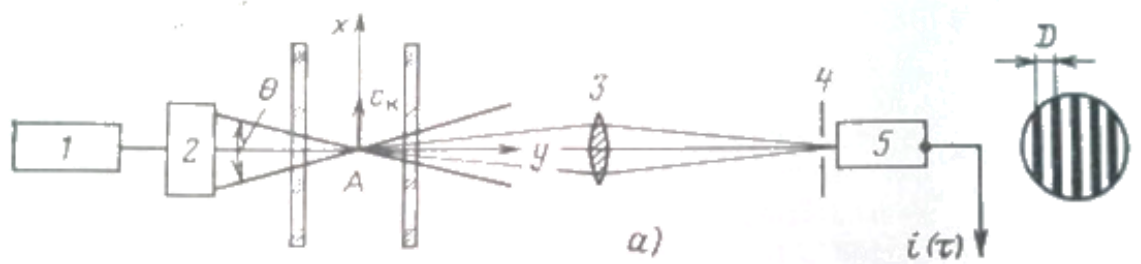


Рисунок 9 – Схема ЛДА [2]

Луч лазера 1 расщепляется в узле 2 на два пучка одинаковой интенсивности под углом θ в точке А канала, где вдоль оси x движутся светорассеивающие частицы со скоростью c_k . Свет, рассеянный частицами вдоль оси y , собирается объективом 3 на поверхности катода фотоприемника 5. Диафрагма 4 служит для уменьшения шумов. В точке пересечения когерентных пучков А возникает пространственная синусоидальная интерференционная решетка. При пролете светорассеивающими частицами со скоростью c_k элемента А возникает модуляция рассеянного частицей света с доплеровской частотой. Зная период решетки и доплеровскую частоту можно легко найти c_k [2].

ЛРА изображен на рисунке 10. Луч лазера 1 фокусируется линзой 2 в некоторой точке А потока, где частицы имеют скорость c_k . Изображение этих частиц объективом 3 переносится на плоскость решетки-модулятора 4, расположенного на катоде фотоприемника 5. Зная пространственный период решетки-модулятора, линейный коэффициент преобразования объектива и доплеровскую частоту, то можно найти скорость капли c_k .

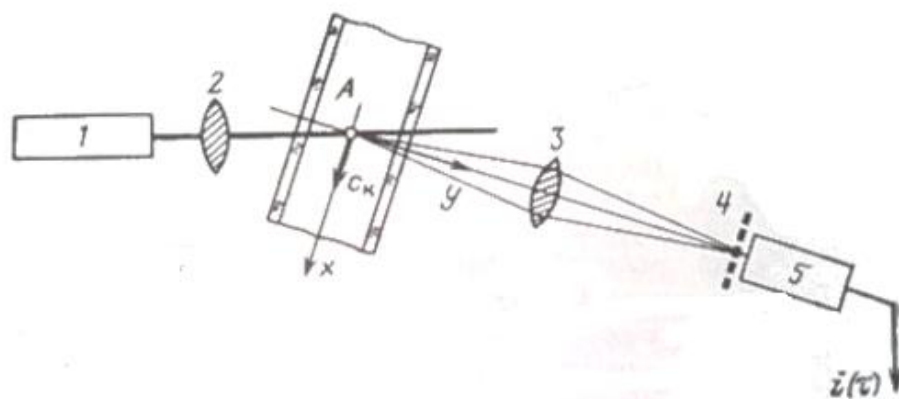


Рисунок 10 – Схема ЛРА [2]

Оптические неоднородности, движущиеся вместе с потоком, не оказывают никакого влияния на лазерные доплеровские анемометры. Главное, чтобы частицы хорошо рассеивали свет, и коэффициент скольжения этих частиц мало отличался от единицы. При исследовании скольжения частиц в жидкой фазе можно применять как ЛРА, так и ЛДА. Однако причиной увеличения фоновых засветок и нарушения когерентности лучей ЛДА является возникновение пленки жидкости на прозрачных стеклах. Из-за этого появляются шумы, приводящие к исчезновению доплеровского сигнала. В ЛРА основная причина ухудшения сигнала объясняется фоновыми засветками. При исследовании такого потока как воздух-вода преимущество на стороне ЛРА в сравнении с ЛДА, использующим бипризму Френеля в качестве расщепителя луча [2].

3 Современные методы определения характеристик двухфазного потока

В настоящее время значительное распространение получили оптические методы с лазером, позволяющие определять бесконтактным методом мгновенные распределения скоростей и размеров частиц многофазового потока. Данные методы коренным образом отличаются от методов, которые представлены выше. Основой является обработка полученных картин образов засвеченных лазером частиц [7]. Лазер предназначен для фиксации быстропротекающих процессов в среде, рассеивающей его излучение и регистрации изменений в среде за короткий промежуток времени. В лазере формируется два импульса когерентного света: большой ($> 5 \cdot 10^6$ Вт) интенсивности и малой ($< 10^{-8}$ с) длительности. Импульсы излучаются с временной задержкой относительно друг друга. [9]. Корреляционная камера регистрирует данную картину. Камера может работать как в двухкадровом, так и в однокадровом режиме. Полученные изображения проходят обработку с помощью специализированного программного обеспечения системы «ActualFlow».

Основное преимущество данного метода заключается в его бесконтактности и получение мгновенных характеристик исследуемого потока.

4 Структура капельной среды за сопловыми решетками турбины

Исследование структуры крупнодисперсной влаги за решетками проводились в МЭИ с помощью специального зонда, принцип работы которого заключается в инерционном осаждении капель влаги на покрытую вязким маслом пластину [6]. Полученные отпечатки фотографировались под микроскопом, а последующая обработка экспериментальных данных позволила построить для каждой точки потока функции распределения массы и определить количество движущихся капель одинакового диаметра.

$$\frac{m_i}{\sum m_i} = f(d_i); \quad \frac{n_i}{\sum n_i} = f(d_i),$$

где m_i и n_i – масса и число капель i – го размера d_i ; $\sum m_i$ и $\sum n_i$ – суммарная масса и число всех капель.

На Рисунке 11 показаны результаты экспериментального исследования структуры двухфазного потока в разных точках вдоль плоскости выходных кромок сопловой решетки С – 9012А [2]. В разных точках наблюдается многопиковые характеристики. Это можно объяснить, наличием нескольких источников образования капель различного размера. К ним относятся зоны, где происходит отрыв пленок, дробление и отражение падающих капель. Наиболее крупными являются капли, образующиеся в закомочных следах решетки. При модальном размере капель на входе $d_{\kappa}^M = 80 \cdot 10^{-6}$ м осредненный размер капель по массе за кромкой составил $d_{\kappa}^M = 280 \cdot 10^{-6}$ м. [6].

Хочется отметить, что при различных значениях начальной влажности пара будет своя картина распределения среднемассовых частиц за сопловой решеткой вдоль шага (Рисунок 12). Максимальный размер

капель обнаруживается в закрочном следе. При удалении от кромки вдоль оси z d_k уменьшается, хотя четкая по дисперсности граница кромочного следа имеет место только со стороны спинки профиля лопатки. Наличие крупных капель в потоке можно наблюдать на расстоянии $\bar{z} = 0.2 \div 0.35$ от кромочного следа со стороны спинки лопатки. Следующий пик наблюдается при $\bar{z} \approx 0.65$. Крупнодисперсная влага в потоке возникает посредством отрыва пленки с лопатки и дальнейшем дроблении капель при контакте со смоченной поверхностью лопатки. Перед решеткой модальный размер капель при увеличении начальной влажности остается практически неизменным $d_k^M = (55 \div 65) \cdot 10^{-6}$ м, а за решеткой наблюдается увеличение размера капель. [6].

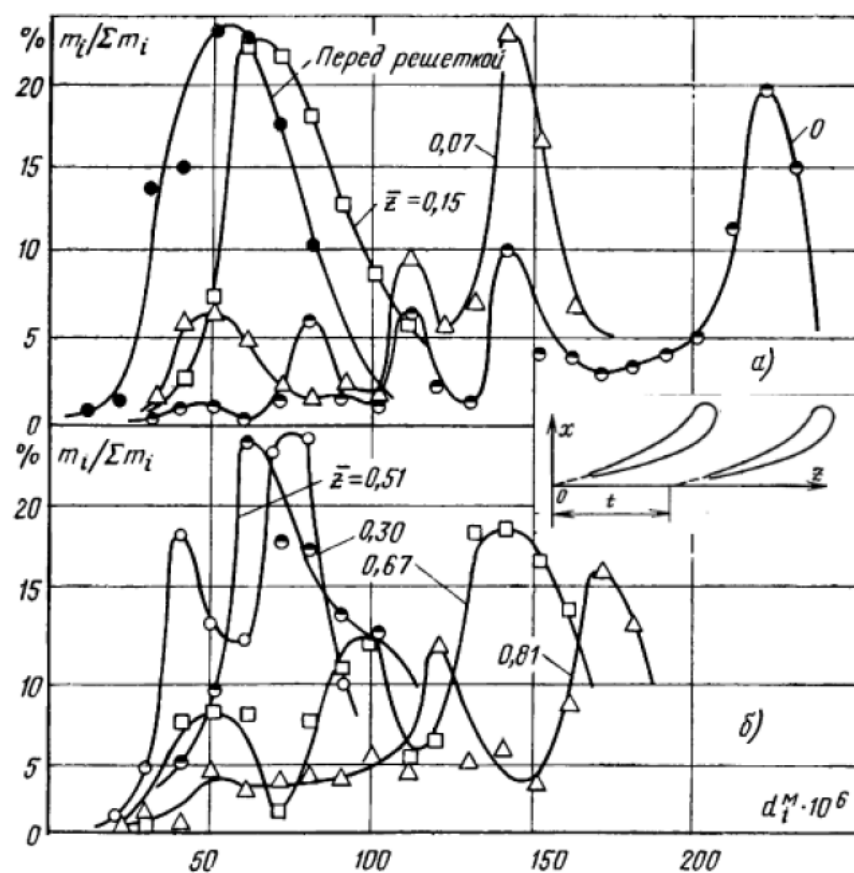


Рисунок 11 - Дисперсность влаги за сопловой решеткой. а,б – зависимость $m_i / \Sigma m_i$ от модального диаметра капель по шагу сопловой решетки ($x = x/t = 0,1$; $y_0 = 2,5\%$; $M_{1t} = 0,7$) [6]

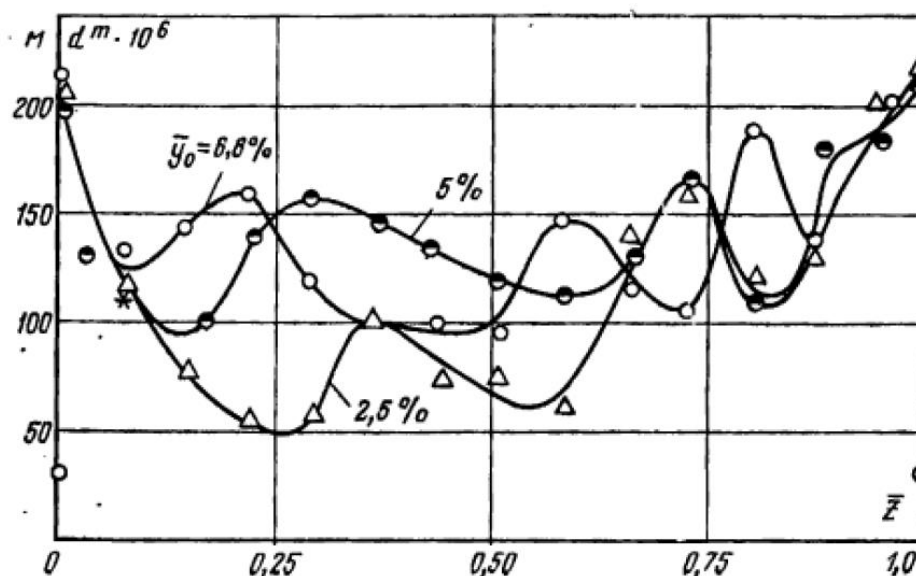


Рисунок 12 - Распределение средних размеров капель за сопловой решеткой вдоль шага при различных значениях начальной влажности пара[6]

При анализе структуры капельных потоков за решеткой важно учитывать их взаимодействие между собой [7]. В работе [25] был определен средний модальный диаметр крупнодисперсной влаги, формирующейся в межлопаточном сопловом канале и за ним. Так размеры капель, образованных за счет срыва и уноса с поверхности пленки составляют 100-150 мкм; размеры отраженных частиц соответствуют диаметрам капель перед исследуемой решеткой. Частицы дискретной фазы, образовавшиеся за счет диффузорного срыва с выпуклой поверхности профиля и срыва водяной пленки с выходной кромки, имеют диаметр более 200 мкм и 170 – 200 мкм соответственно.

5 Влияние режимных параметров на характеристики жидкой фазы за сопловой решеткой турбины

Одним из важных показателей движения жидкой фазы является коэффициент скольжения $\nu = c_k / c_p$ (где c_k - скорость капель; c_p - скорость паровой фазы). С помощью данного коэффициента можно судить о дисперсном составе влаги. У крупных капель дисперсного состава наблюдается пониженное значение данного коэффициента, нежели у частиц малых размеров, которые разгоняются до скорости потока намного быстрее.

На Рисунке 13 представлены распределения коэффициентов скольжения $\nu = c_k / c_p$ (где c_k - скорость капель; c_p - скорость паровой фазы). Из представленных данных видно, что наименьшую скорость имеют капли вблизи кромок и других областях, где формируются крупные капли, а наибольшую - движущиеся в ядре потока [2]. Определение коэффициента скольжения экспериментальным путем имеет низкое значение. Из представленных данных видно, что с увеличением теоретического числа Маха коэффициенты скольжения возрастают в зонах крупнодисперсной влаги, а в ядре потока уменьшаются.

Влияние числа Рейнольдса можно наблюдать на Рисунке 13, б. С ростом Re значения коэффициентов скольжения увеличиваются во всех точках поля, при этом размеры частиц уменьшаются с увеличением Re . Хочется отметить, что влияние данного параметра в первую очередь связано с изменением плотности несущей фазы. На Рисунке 13, г, можно заметить, что увеличение плотности парового потока ($\rho = \rho_k / \rho_p$, где ρ_k - плотность жидкости; ρ_p - плотность паровой фазы) приводит к росту коэффициентов скольжения. Опытами установлено также, что значения коэффициентов скольжения в большой степени зависят от степени влажности. С увеличением степени влажности (y_0) происходит изменение капельной структуры в канале, что приводит к снижению скорости капель.

Помимо выше всего перечисленного следует брать во внимание информацию о средних значениях коэффициентов скольжения в рамках одномерного подхода [31]. На Рисунке 14 представлена зависимость среднего значения ν в зависимости от удаления от выходной кромки канала и некоторых режимных параметров [2].

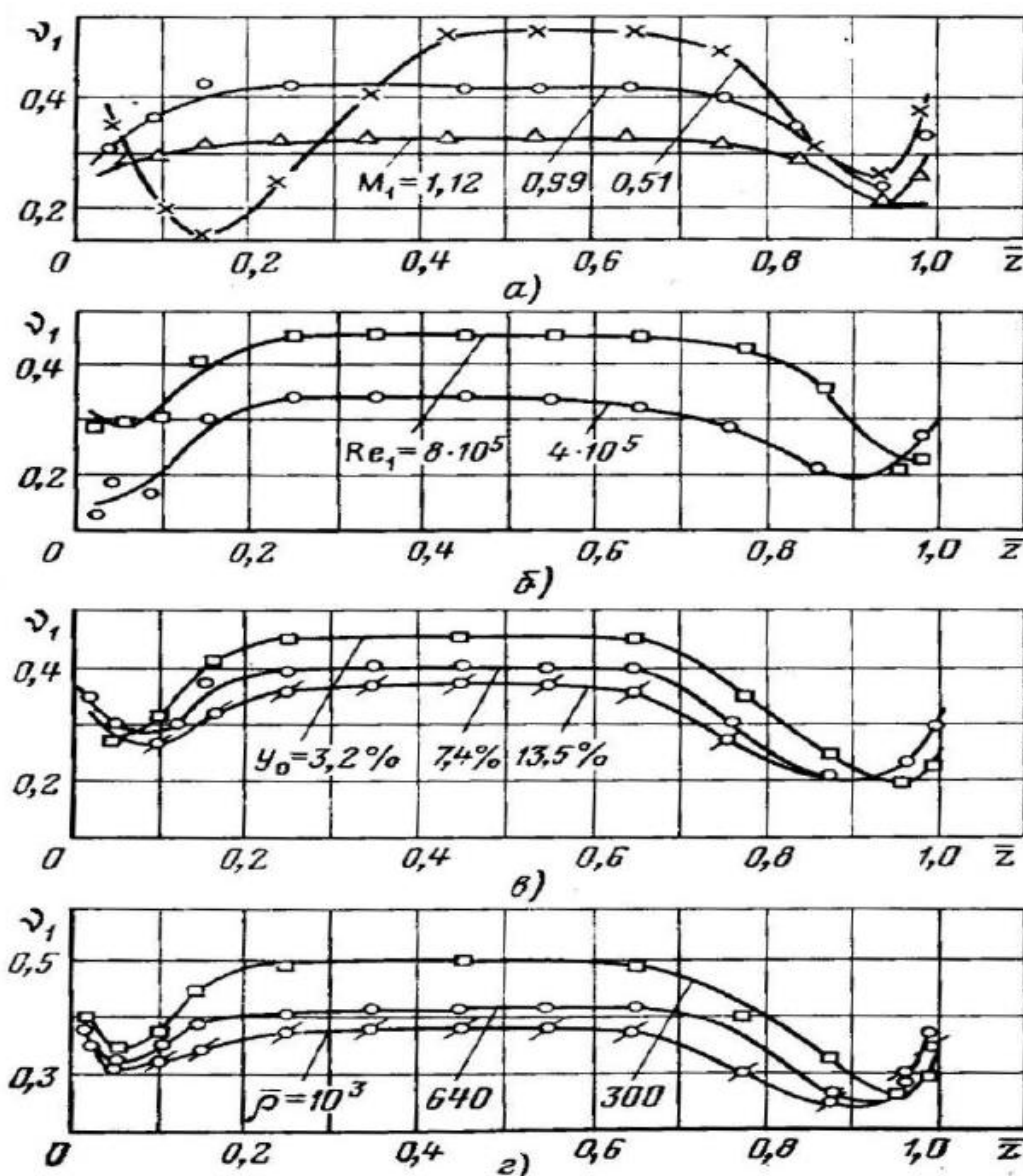


Рисунок 13 - Влияние чисел Маха (а), Рейнольдса (б), влажности (в) и отношения плотностей (г) на распределение локальных коэффициентов скольжения по шагу за сопловой решеткой типа С-9015Б [2]

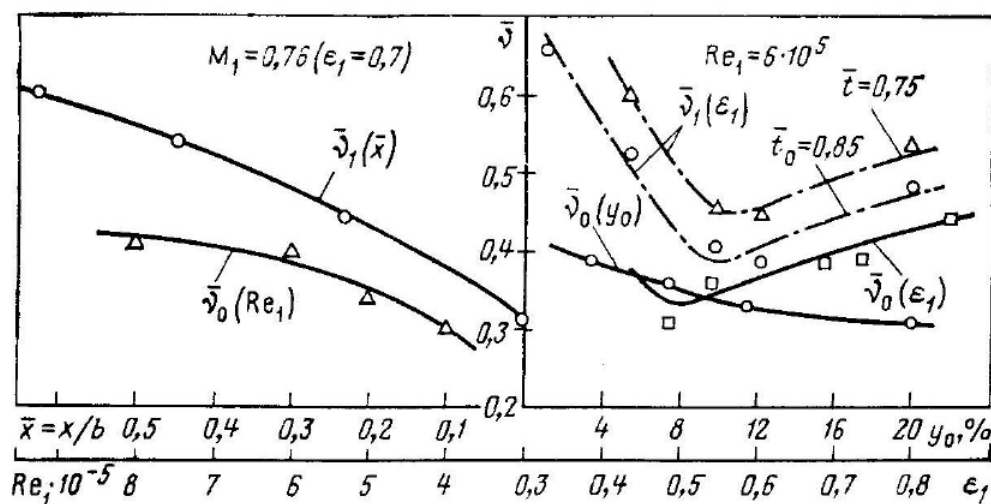


Рисунок 14 - Осредненные коэффициенты скольжения за сопловой решеткой в зависимости от режимных и некоторых геометрических параметров и расстояния от решетки [2]

Распределение коэффициентов скольжения меняется при изменении осевого зазора. Вначале коэффициенты скольжения интенсивно возрастают. Затем влияние зазора ослабевает в соответствии с проявлением эффектов слияния более мелких капель.

На дисперсный состав влаги оказывают существенное влияние скоростные характеристики и режимные параметры течения. На Рисунке 1.20 отображены распределения среднемассовых диаметров капель, полученных в результате различных исследований и обобщенных в [7].

На рисунке 15а представлено, что среднемассовые диаметры капель увеличиваются во всех точках выходного сечения с ростом начальной влажности пара. Важно отметить, что при малой влажности характер распределения диаметров несколько иной, так как пленка на спинке профиля еще не сформировалась. Дальнейшее увеличение влажности приводит к установлению характерного распределения диаметров капель за решеткой.

Значение чисел Маха и Рейнольдса (Рисунки 15, б, в) воздействуют на дисперсный состав жидкой фазы за решеткой. Это связано с

механическим взаимодействием основного потока и дискретными частицами. Происходит изменение аэродинамического сопротивления капель, характера волнового движения на поверхности пленки, интенсивности процессов уноса и срыва частиц [7]. Все это приводит к изменению структуры и характеристик пограничного слоя. Водяная пленка, образовавшаяся на поверхности лопаток, является основным источником крупнодисперсной влаги за сопловой решеткой.

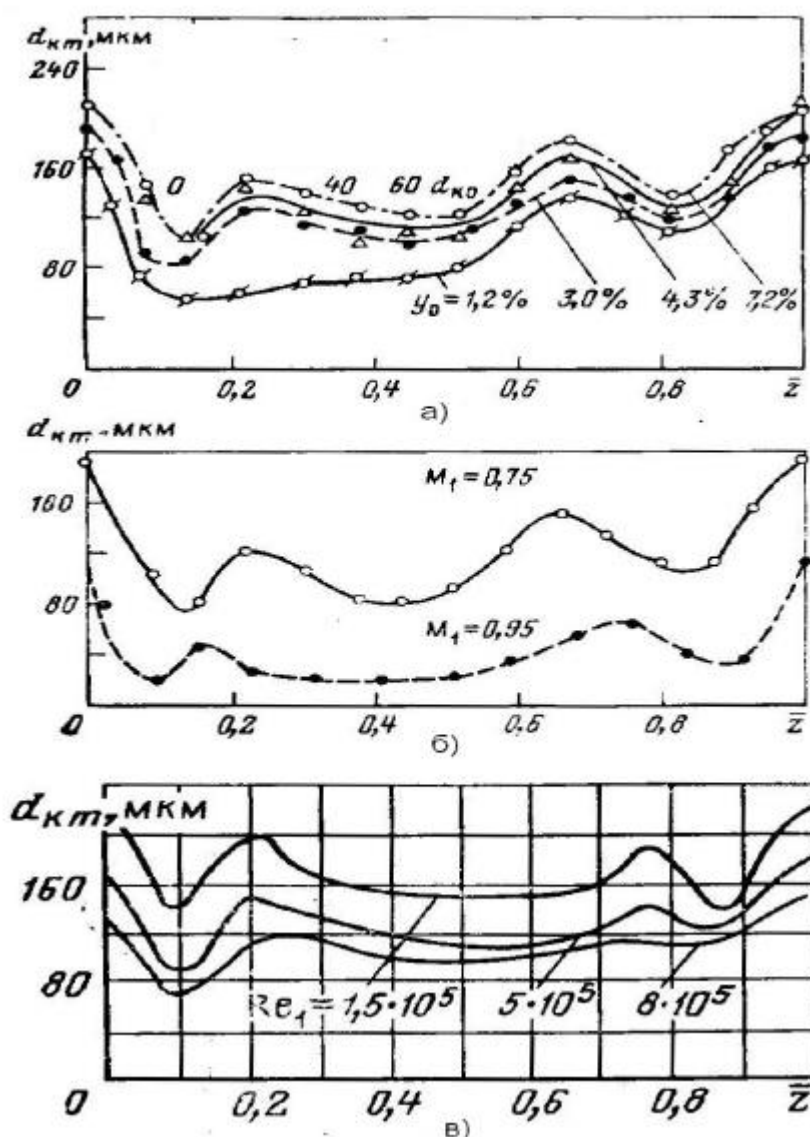


Рисунок 15 - Влияние начальной влажности пара на дисперсный состав жидкой фазы. а: от начальной влажности пара; б: от теоретического числа Маха; в: от числа Рейнольдса [2]

6 Постановка целей и задач исследования

Обзор литературы показал, что существует различное многообразие контактных и бесконтактных методов позволяющих определить характеристики капельной влаги в двухфазном потоке. Из представленных данных видно, что основная масса частиц, которая может достигать 50% от всего расхода дискретной фазы, формируется в области за сопловыми решетками.

Процессы, протекающие при движении влажного пара очень сложны и многообразны, наибольший интерес среди них представляют явления, которые приводят к появлению дополнительных потерь располагаемой энергии в ступени. Основной причиной появления дополнительных потерь располагаемой энергии является рассогласование векторов скоростей несущей фазы и частиц жидкости при их диаметре больше 5мкм.

Появление относительно недавно, новых оптических методов для исследования двухфазных потоков, открывает возможность для более глубокого изучения процессов, происходящих при течении двухфазного потока в каналах турбинной ступени. В перспективе данные методы позволят одновременно определять мгновенные поля скоростей и средние размеры капель дискретной фазы за сопловой решеткой.

Таким образом, из выше всего сказанного вытекают следующие задачи:

1. Формирование измерительной системы для регистрации параметров двухфазного потока.
2. Проектирование, изготовление и наладка экспериментального стенда и системы измерений.
3. Проведение экспериментов по исследованию основных характеристик двухфазного потока.
4. Обработка результатов эксперимента.
5. Анализ полученных данных.

9 Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Существует множество факторов, определяющих перспективность научного исследования. Одним из таких факторов является коммерческая ценность разработки.

Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно знать для анализа перспектив проводимых научных исследований.

Таким образом, целью данного раздела является технико-экономическое обоснование научно-исследовательской работы (НИР), определение его перспективности и научно-технической результативности, определение и анализ трудовых и денежных затрат.

Научно-исследовательская работа включает в себя исследование схода влаги с различных кромок лопатки. При создании комплекса использовались среда программирования Turbo Pascal. На основе НИР оформлена диссертационная работа в пакете программ Microsoft Office.

Для достижения поставленных целей данного раздела поставлены следующие задачи [1]:

- организация работ по НИР;
- определение этапов работы;
- определение трудоемкости работы;
- расчет нарастания технической готовности работ;
- составление план-графика, сметы затрат;
- FAST-анализ проекта;
- оценка экономической эффективности НИР.

9.1 Организация и планирование работ

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо оптимально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ. Залогом успешной реализации любого проекта является оптимальное планирование занятости каждого из его участников и сроков проведения отдельных работ на этапе организации процесса.

На данном этапе были установлены полный перечень проводимых работ, их исполнителей и оптимальная продолжительность. Научным руководителем (НР) проекта является Шевелев Сергей Анатольевич. Руководитель выполняет координацию деятельности участников проекта, производит опытно-конструкторскую работу. Исполнителем (И) является Габдуллина Альбина Ильгизовна. Исполнитель производит поиск и представление информации, проводит экспериментальные измерения по теме проекта. А также выполняет необходимые задания и указания руководителя.

Перейдем к расчету продолжительности этапов работ, который осуществляется опытно-статистическим методом, реализуемый вероятностным способом. Основные формулы для расчета (4.1)-(4.4) взяты из [17]. Для определения ожидаемого значения продолжительности работ $t_{ож}$ воспользуемся формулой:

$$t_{ож} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5}, \quad (1)$$

где t_{min} – минимальная трудоемкость работ, чел/дн.;

t_{max} – максимальная трудоемкость работ, чел/дн.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях, $T_{рд}$ выполняется по формуле:

$$T_{рд} = \frac{t_{ож}}{K_{вн}} \cdot K_{д}, \quad (2)$$

где $t_{ож}$ – трудоемкость работы, чел/дн.;

$K_{вн}$ – коэффициент выполнения работ ($K_{вн}=1$);

K_d – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсации и согласование работ ($K_d=1,2$).

Продолжительность этапа в календарных днях $T_{кд}$:

$$T_{кд} = T_{рд} \cdot T_k, \quad (3)$$

где T_k – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности T_k рассчитывается по формуле:

$$T_k = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вд} - T_{пд}}, \quad (4)$$

где $T_{кал}$ – календарные дни ($T_{кал}=365$);

$T_{вд}$ – выходные дни ($T_{вд}=52$);

$T_{пд}$ – праздничные дни ($T_{пд}=22$).

$$T_k = \frac{365}{365 - 52 - 22} = 1,254.$$

9.2 Расчет нарастания технической готовности работ

Следующим этапом является расчет нарастания технической готовности работ. Величина нарастания технической готовности работы H_i показывает, на сколько процентов выполнена работа на каждом этапе. Данная величина вычисляется по формуле [14]:

$$H_i = \frac{t_{H_i}}{t_o} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где t_{H_i} – нарастающая трудоемкость с момента начала работы i -го этапа;

t_o – общая трудоемкость.

Общая трудоемкость t_o [14]:

$$t_o = \sum_{i=1}^n t_{ож_i}, \quad (6)$$

где $t_{ож_i}$ – ожидаемая продолжительность i -го этапа.

Удельный вес каждого этапа Y_i [14]:

$$Y_i = \frac{t_{ож_i}}{t_o} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Результаты вычислений H_i и Y_i отражены в таблице 1.

Таблица 1 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа.

№ п/п	Этап	H_i , %	Y_i , %
1	Формулирование и утверждение задачи	0,36	0,36
2	Составление технического задания на проект	0,55	0,18
3	Подбор и изучение материалов по тематике	11,86	11,31
4	Разработка календарного плана	17,52	5,66
5	Разработка общего алгоритма программного комплекса	29,74	12,23
6	Реализация алгоритма в среде программирования	52,37	22,63
7	Отладка полученного программного комплекса	63,69	11,31
8	Проведение численных экспериментов	83,58	19,89
9	Обработка результатов	89,05	5,47
10	Оформление расчетно-пояснительной записки	94,53	5,47
11	Подведение итогов	100,00	5,47

9.3 Расчет сметы затрат на исследование

В состав затрат на создание проекта включается стоимость всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. При планировании бюджета необходимо провести полную оценку всех расходов, необходимых для ее выполнения. Расчет сметной стоимости на выполнение данной разработки производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- основная заработная плата;
- дополнительная заработная плата
- отчисления в социальные фонды;

- расходы на электроэнергию;
- амортизационные отчисления;
- работы, выполняемые сторонними организациями;
- прочие расходы.

9.3.1 Материалы и покупные изделия

Оценим затраты на материалы. К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ. Цена материальных ресурсов определяется по средней рыночной стоимости на 2016 год по соответствующим ценникам и приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Специальное оборудование [15],[16]

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Количество	Сумма, руб.
Офисная техника			
Персональный компьютер	25000	1	25000
Клавиатура	500	1	500
Мышка	500	1	500
Принтер	4000	1	4000
Офисная мебель			
Стол	2000	1	2000
Стул	700	1	700
Программное обеспечение			
Turbo Pascal	10000	1	4000
Microsoft Office 2010	21000	1	21000
Итого:	52700		

В эту же статью расходов включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов).

Таблица 3 – Сырье, материалы и комплектующие изделия

п/п	Наименование	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
-----	--------------	--------	-----------------------	-------------

1	Блокнот	2 шт.	40	80
---	---------	-------	----	----

Продолжение таблицы 3

2	Бумага для принтера формата А4	1 уп.	200	200
3	Ручка шариковая	2 шт.	10	20
4	Карандаш	2 шт.	10	20
5	Картридж	1 шт.	500	500
Всего за материалы				820
Всего				53520

9.3.2 Основная заработная плата

Данная статья расходов включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта (научный руководитель, исполнитель). Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Основная заработная плата работника определяется по формуле [14]:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (8)$$

где $З_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.;

$T_{\text{раб}}$ – продолжительность работ в рабочих днях.

Среднедневная заработная плата $З_{\text{дн}}$ рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (9)$$

где $З_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при отпуске в 24 раб. дня $M=11,2$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней $M=10,4$ месяца, 6-дневная неделя);

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Месячный должностной оклад работника [14]:

$$Z_m = Z_6 \cdot k_p, \quad (10)$$

где k_p – районный коэффициент в Томске.

Таким образом, месячный должностной оклад научного руководителя (доцент, к.т.н.) составляет:

$$Z_{м.нр.} = 23264,86 \cdot 1,3 = 30244 \text{ руб.}$$

Месячный должностной оклад исполнителя, как студента второго курса магистратуры:

$$Z_{м.и.} = 2145 \cdot 1,3 = 2788,5 \text{ руб.}$$

Определим действительный годовой фонд рабочего времени F_0 научного руководителя, исполнителя, исходя из того, что они работают по 6-дневной неделе (таблица 4).

Таблица 4 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	74	74
- выходные дни	52	52
- праздничные дни	22	22
Потери рабочего времени	48	0
- отпуск	48	0
- невыходы по болезни	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	291

Среднедневная заработная плата научного руководителя:

$$Z_{дн.нр.} = \frac{30244 \cdot 10,4}{241} = 1229 \text{ руб.}$$

Среднедневная заработная плата исполнителя:

$$Z_{дн.и.} = \frac{2788,5 \cdot 10,4}{291} = 113 \text{ руб.}$$

Исходя из количества рабочих, основная заработная плата для научного руководителя составит:

$$Z_{осн.нр.} = 1229 \cdot 181 = 222390 \text{ руб.}$$

для исполнителя:

$$З_{\text{осн.и.}} = 113 \cdot 369 = 41697 \text{ руб.}$$

Итоговый расчёт основной заработной платы приведён в таблице 5.

Таблица 5 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$З_{\text{м.}}$, руб.	$З_{\text{дн.}}$, руб.	$T_{\text{раб.}}$ раб. дн.	$З_{\text{осн.}}$, руб.
Научный руководитель	30244	1229	181	222390
Исполнитель	2788,5	113	369	41697

9.3.3 Расчет дополнительной заработной платы

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы [14].

Таким образом, дополнительная заработная плата:

для научного руководителя:

$$З_{\text{д.нр.}} = 0,12 \cdot 222390 = 26687 \text{ руб.}$$

для исполнителя:

$$З_{\text{д.нр.}} = 0,12 \cdot 41697 = 5003 \text{ руб.}$$

Фонд заработной платы [1]:

$$\Phi ЗП_{\text{д.нр.}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{д.}}; \quad (11)$$

для научного руководителя:

$$\Phi ЗП_{\text{нр.}} = 222390 + 26687 = 249077 \text{ руб.}$$

для исполнителя:

$$\Phi ЗП_{\text{нр.}} = 41697 + 5003 = 46700 \text{ руб.}$$

Общий фонд заработной платы:

$$\Phi ЗП = \Phi ЗП_{\text{нр.}} + \Phi ЗП_{\text{и.}} = 249077 + 46700 = 295777 \text{ руб.}$$

9.3.4 Расчет отчислений на социальные нужды

Затраты по этой статье составляют отчисления по единому социальному налогу (ЕСН). Отчисления на социальные нужды включают в себя отчисления во внебюджетные фонды: пенсионный фонд, фонд ОМС и т.д. Коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды $k_{\text{внеб}}$ составляет 30% [14].

$$C_{\text{соц}} = k_{\text{внеб}} \cdot \text{ФЗП}. \quad (12)$$

Отчисления по заработной плате для научного руководителя:

$$C_{\text{соц}} = 0,3 \cdot 249077 = 74723,1 \text{ руб.}$$

для исполнителя:

$$C_{\text{соц}} = 0,3 \cdot 46700 = 14010 \text{ руб.}$$

9.3.5 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию при работе оборудования, а также затраты на электроэнергию, потраченную на освещение. Затраты на электроэнергию при работе оборудования для технологических целей $\mathcal{E}_{\text{об}}$:

$$\mathcal{E}_{\text{об}} = P_{\text{об}} \cdot \Pi_{\text{эл}} \cdot t_{\text{об}}, \quad (13)$$

где $P_{\text{об}}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$\Pi_{\text{эл}}$ – тарифная цена за 1 кВт·час, принимаем $\Pi_{\text{эл}} = 2.93 \text{ руб/кВт} \cdot \text{час}$;

$t_{\text{об}}$ – время работы оборудования, час.

Из календарного плана следует, что научный руководитель проекта занят календарных 208 дней (181 рабочих дня), исполнитель проекта занят календарных 525 дней (369 рабочих дня).

Время работы оборудования вычисляется на основе календарного плана из расчета, что продолжительности рабочего дня – 8 часов:

$$t_{об} = T_{рд} \cdot 8; \quad (14)$$

$$t_{об.нр.} = 181 \cdot 8 = 1448 \text{ ч};$$

$$t_{об.и.} = 369 \cdot 8 = 2952 \text{ ч.}$$

Мощность, потребляемая оборудованием $P_{об}$, принимаем равную мощности блока питания компьютера и монитора [15]:

$$P_{об} = P_{БП} + P_{м}; \quad (15)$$

$$P_{об} = 0,4 + 0,1 = 0,5 \text{ кВт.}$$

$$\mathcal{E}_{об} = 0,5 \cdot 2,93 \cdot (1448 + 2952) = 6446 \text{ руб.}$$

Затраты на электроэнергию для освещения помещения, где осуществлялось выполнение проекта $\mathcal{E}_{ос}$:

$$\mathcal{E}_{ос} = P_{ос} \cdot \Pi_{эл} \cdot t_{ос}, \quad (16)$$

где $P_{ос}$ – мощность, потребляемая осветительными приборами, кВт;

$t_{ос}$ – время работы осветительных приборов, час.

Мощность, потребляемая освещением $P_{ос}$:

$$P_{ос} = P_{уст.ос.} \cdot K_C, \quad (17)$$

где $P_{уст.ос.}$ – установленная мощность осветительных приборов, принимаем $P_{уст.ос.} = 1,28 \text{ кВт}$;

K_C – коэффициент спроса для внутреннего освещения, принимаем $K_C = 0,9$.

$$P_{ос} = 1,28 \cdot 0,9 = 1,15 \text{ кВт.}$$

Время работы освещения $t_{ос}$:

$$t_{ос} = T_{рд} \cdot t_{сут}, \quad (18)$$

где $t_{сут}$ – длительность работы освещения за смену, час.

$$t_{ос} = 5 \cdot 369 = 1845 \text{ ч.}$$

$$\mathcal{E}_{ос} = 1,15 \cdot 2,93 \cdot 1845 = 6216 \text{ руб.}$$

Общие затраты на электроэнергию \mathcal{E} :

$$\Xi = \Xi_{об} + \Xi_{ос};$$

$$\Xi = 6446 + 6216 = 12662 \text{ руб.}$$

9.3.6 Расчет амортизационных расходов

Амортизационные отчисления рассчитывались на время использования ЭВМ по формуле [14]:

$$C_{ам} = \frac{H_{ам} \cdot \Pi_{об}}{F_{д}} \cdot t_{ВТ}, \quad (19)$$

где $H_{А}$ – годовая норма амортизации, принимаем $H_{А}=25\%$;

$\Pi_{об}$ – цена оборудования, из таблицы 4 $\Pi_{об}=25000$ руб.;

$F_{д}$ – действительный годовой фонд рабочего времени, $F_{д}=2416$ ч.;

$t_{ВТ}$ – время работы вычислительной техники при создании программного продукта:

$$t_{ВТ} = 295 \cdot 8 = 2360 \text{ ч};$$

$$C_{ам} = \frac{0,25 \cdot 25000}{2416} \cdot 2360 = 6105 \text{ руб.}$$

9.3.7 Оплата работ, выполняемых сторонними организациями

Оплата работ, выполняемых сторонними организациями, включает в себя:

- Услуги Internet 300 руб. в месяц. За 20 месяцев – 6000 руб.
- Переплет – 100 руб.

Суммарные расходы на оплату работ, выполняемых сторонними организациями: 6100 руб.

9.3.8 Прочие расходы

Для оценки не учтённых в предыдущих статьях расходов рассчитаем прочие расходы [14]. Прочие расходы составляют 16 % от единовременных затрат на выполнение технического продукта и проводятся по формуле:

$$C_{\text{проч}} = 0,16 \cdot (C_{\text{мат}} + 3_{\text{осн}} + C_{\text{соц}} + \text{Э} + C_{\text{ам}}); \quad (4.20)$$

$$C_{\text{проч}} = 0,16 \cdot (53520 + 264087 + 14010 + 7822 + 6105) = 55287 \text{ руб.}$$

9.3.9 Плановая себестоимость проекта

Определим общую себестоимость НИР путем сведения рассчитанных статей расчета в смету (таблица 6).

Таблица 6 – Смета затрат на НИР.

п/п	Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
1	Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	53520
2	Фонд оплаты труда	ФЗП	295777
3	Отчисления из ФОТ	$C_{\text{соц}}$	14010
4	Расходы на электроэнергию	Э	12662
5	Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	6105
6	Работы, выполняемые сторонними организациями	$C_{\text{стор}}$	6100
7	Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	55287
Итого:		C	443461

Таким образом, расходы на НИР составили $C = 443461$ руб.

9.4. FAST-анализ проекта

FAST-анализ проведен в качестве оценки эффективности проекта. Он выступает как синоним функционально-стоимостного анализа. Суть этого метода базируется на том, что затраты, связанные с созданием и использованием любого объекта, выполняющего заданные функции, состоят из необходимых для его изготовления и эксплуатации и дополнительных, функционально неоправданных, излишних затрат, которые возникают из-за введения ненужных функций, не имеющих прямого отношения к назначению объекта, или связаны с несовершенством конструкции, технологических процессов, применяемых материалов, методов организации труда и т.д. [14]

Первоначально обозначим объект FAST-анализа. В рамках данной работы производилось создание программного комплекса для определения поля течения за кромкой лопатки. Этот программный комплекс подлежит FAST-анализу.

Опишем главную, основную и вспомогательную функции, выполняемых объектом. В рамках данной стадии FAST-анализа объект анализируется с позиции функционального устройства. Главная функция определяет назначение, сущность и главную цель создания объекта в целом. Основные функции обеспечивают принцип работы объекта и создают необходимые условия для осуществления главной функции. Вспомогательные функции способствуют реализации основных функций. Функции программного комплекса приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Классификация функций программного комплекса

№	Наименование детали (узла, процесса)	Выполняемая функция	Главная	Основная	Вспомогательная
1	Определение начального вектора скорости влаги	Для заданных условий процесса схода влаги определяет начальную скорость влаги			
2	Определение конечного вектора скорости влаги	Для заданных условий процесса схода влаги определяет конечную скорость влаги			
3	Определение диаметра капель влаги	Выводит значение числа Рейнольдса для воздуха, по которому можно определить режим течения жидкости			
4	Определение свойств влаги	Определяет теплофизические свойства влаги при заданных давлении и температуре			
5	Определение свойств воздуха	Определяет теплофизические свойства воздуха при			

		средней температуре воздуха			
--	--	--------------------------------	--	--	--

Определим значимости выполняемых программным комплексом функций. Для оценки значимости функций используется метод расстановки приоритетов, предложенный Блюмбергом В.А. и Глущенко В.Ф. Первоначально строим матрицу смежности функций программного комплекса из условия что знак «=» означает одинаковые функции по значимости; «<» – менее значимая; «>» – более значимая.

Матрица смежности функций программного комплекса представлена в таблице 8.

Таблица 8 – Матрица смежности функций программного комплекса

№ функции	1	2	3	4	5
1	=	>	>	>	>
2	<	=	>	>	>
3	<	<	=	>	>
4	<	<	<	=	>
5	<	<	<	<	=

Примечание: Номера функций взяты по таблице 5

Преобразуем матрицу смежности в матрицу количественных соотношений функций программного комплекса (таблица 4) при условии замены знака «<» на 0,5; знака «>» на 1,5; знака «=» на 1.

Определим значимость функций Z_H путем деления балла, полученного по каждой функции, на общую сумму баллов по всем функциям [14]:

$$Z_H = \frac{\sum_i i}{\sum}, \quad (20)$$

где \sum_i – суммарный бал по каждой функции (таблица 7.10);

\sum – общая сумма баллов по всем функциям.

Таблица 9 – Матрица количественных соотношений функций программного комплекса [14]

№ функции	1	2	3	4	5	Итого
-----------	---	---	---	---	---	-------

1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	7
2	0,5	1	1,5	1,5	1,5	6

Продолжение таблицы 9

3	0,5	0,5	1	1,5	1,5	5
4	0,5	0,5	0,5	1	1,5	4
5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	3
Σ						25

Сведем значимости функций программного комплекса в таблицу 10.

Таблица 10 – Значимости функций программного комплекса [1]

№ функции	Наименование функции	Σ_i	Зн
1	Определение начального вектора скорости влаги	7	0,28
2	Определение конечного вектора скорости влаги	6	0,24
3	Определение диаметра капель влаги	5	0,20
4	Определение свойств влаги	4	0,16
5	Определение свойств воздуха	3	0,12
	Σ	25	1,00

Заключительным этапом FAST-анализа является анализ стоимости функций, выполняемых программным комплексом. Для этого рассчитаем себестоимость каждой из функций программного комплекса. Так как функции программного комплекса пишутся инженером, то себестоимость i -функции определяется:

$$Cб = T_i \cdot \frac{C}{\Sigma T_i}, \quad (21)$$

где T_i – трудоемкость создания функции, час.

C – затраты на НИР, из таблицы 6.7 $C=295777$ руб.;

ΣT_i – суммарная трудоемкость создания функций.

Сведем анализ стоимости функций, выполняемых программным комплексом в таблицу 11.

Таблица 11 – Анализ стоимости функций, выполняемых программным комплексом

№ функции	Наименование функции	T_i час	Сб, руб
1	Определение конечной температуры газа	18	100452
2	Определение конечной температуры воздуха	17	94872
3	Определение диаметра капель влаги	10	55807
4	Определение свойств влаги	4	22323
5	Определение свойств воздуха	4	22323
Σ		53	295777

На основе данных таблиц 10 и 11 построим функционально-стоимостную диаграмму программного комплекса, представленную на рисунке 24.

Как видно из рисунка 24 главная и основные функции программного комплекса (№1-7) имеют большую значимость для проекта и составляют примерно 87% себестоимости программного комплекса. Оставшиеся вспомогательные функции программного комплекса не требуют больших вложений и повышают информативность программного комплекса.

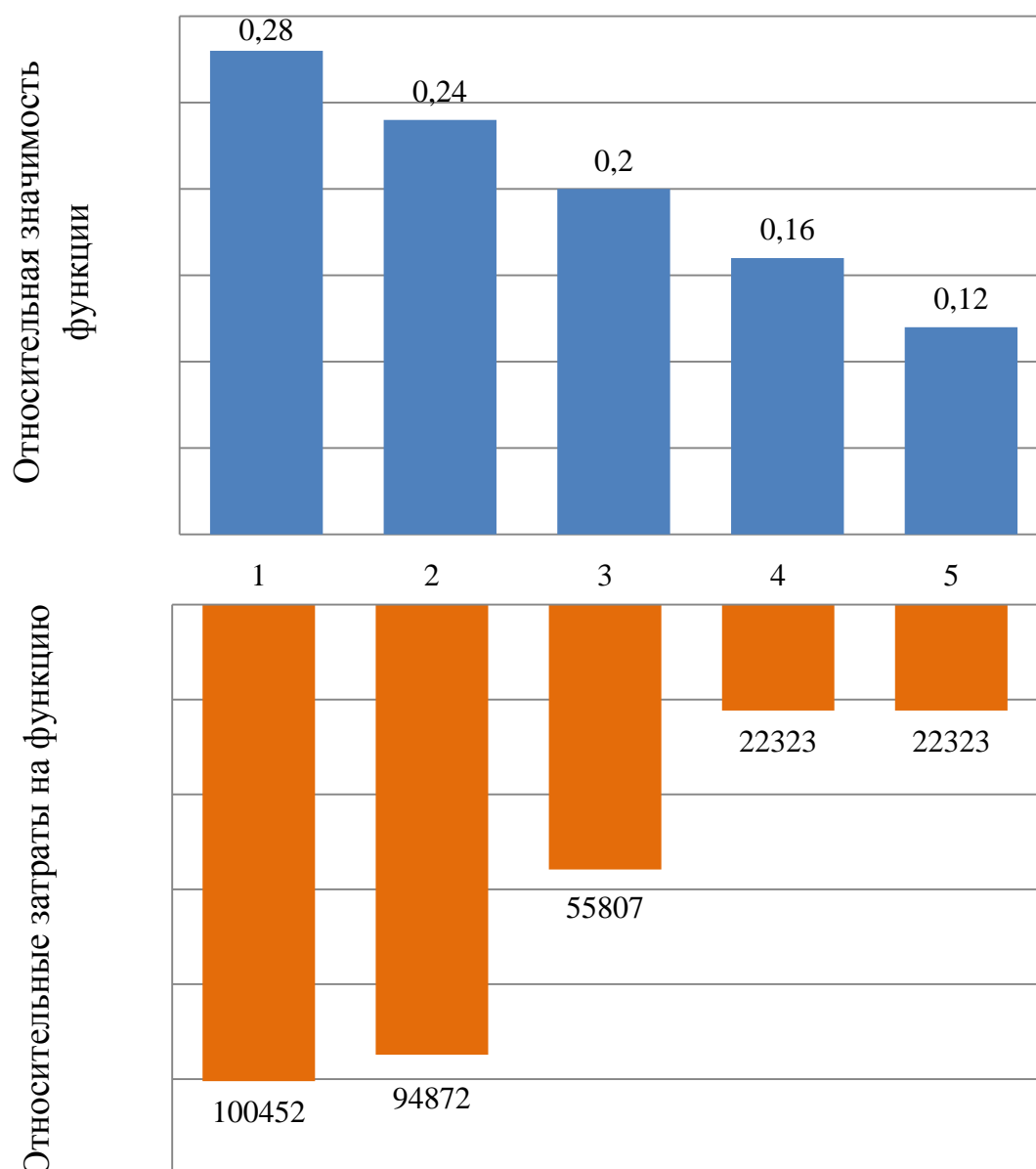


Рисунок 24 – Функционально-стоимостная диаграмма программного комплекса

9.7 Выводы по главе

В данной части работы рассмотрен FAST-анализ программного комплекса, определены этапы и трудоемкость работ, составлена смета затрат, произведен расчет нарастания технической готовности программного комплекса и осуществлено технико-экономическое обоснование НИР.

FAST-анализ показал значимость программного комплекса, использование которого в будущем, позволит определить характер схода жидкости с кромок лопаток различной формы и течения влаги в кромочном следе. Это позволит уменьшить потери от влажности, а так же избавиться от эрозии последних лопаток влажнопаровых турбин.